

4  
(19)



JAPANESE PATENT OFFICE

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number: 63304120 A  
(43) Date of publication of application: 12.12.1988

(51) Int. Cl G01H 1/10  
G01H 17/00

(21) Application number: 62139776  
(22) Date of filing: 05.06.1987

(71) Applicant: HITACHI LTD  
(72) Inventor: KANEKO RYOICHI  
OKABE AKIRA  
NAKAHARA SHINICHI

(54) TORSIONAL VIBRATION MEASURING  
METHOD

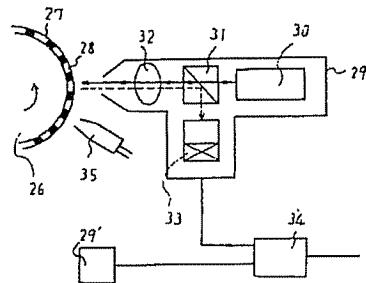
(57) Abstract:

PURPOSE: To surely and with high accuracy measure by an axis a vibration mode in which a blade and the axis are coupled and the blade oscillates mainly, by providing alternately a minute ruggedness in the peripheral direction on the outside periphery of a rotation axis, and also, providing the ruggedness on the surface of the rotation axis so as to be parallel to the axial direction of the rotation axis.

CONSTITUTION: At the time of measuring a torsional vibration of a turbine generator, especially, a torsional vibration coupled by a blade and an axis of higher order, it can be executed by constituting a striped pattern at an interval of  $0.5W1\mu m$  on the axial periphery, and measuring a variation of the number of counting within a prescribed time of the number of its stripes. Subsequently, with respect to a wide band 27 of a bright and dark pattern, which has been fixed firmly to an axis 26,

a light beam is made incident from a laser oscillator 30 of a detector 29, a reflected light from a bright pattern 28 is converted to an electric signal by a photodetector 33, and the number of a prescribed time interval of the bright pattern 28 is counted continuously. The detector 29 is installed on the opposite side by  $180^\circ$  from the axis 26, as well, and by adding a signal from the detector 29 by an adder 34, the influence of an axial vibration of the axis 26 is eliminated.

COPYRIGHT: (C)1988,JPO&Japio





## ⑫ 公開特許公報 (A)

昭63-304120

⑬ Int.C1.1

G 01 H 1/10  
17/00

識別記号

府内整理番号

⑭ 公開 昭和63年(1988)12月12日

7517-2G  
A-7517-2G

審査請求 未請求 発明の数 1 (全7頁)

⑮ 発明の名称 振り振動測定方法

⑯ 特願 昭62-139776

⑯ 出願 昭62(1987)6月5日

⑰ 発明者 金子了市 茨城県日立市幸町3丁目1番1号 株式会社日立製作所日立工場内

⑰ 発明者 岡部明 茨城県日立市幸町3丁目1番1号 株式会社日立製作所日立工場内

⑰ 発明者 中原信一 茨城県日立市幸町3丁目1番1号 株式会社日立製作所日立工場内

⑰ 出願人 株式会社日立製作所 東京都千代田区神田駿河台4丁目6番地

⑰ 代理人 弁理士 小川勝男 外2名

## 明細書

とを特徴とする振り振動測定方法。

## 1. 発明の名称

振り振動測定方法

## 2. 特許請求の範囲

1. 回転軸の外周上に円周方向に微細な凹凸を交互に、かつ、前記凹凸が前記回転軸の軸方向に平行に前記回転軸の表面に直接加工、あるいは、前記凹凸をもつ帯状のものを前記回転軸上に凹凸が軸方向に平行、かつ、等間隔になるよう周方向に堅固に装着するものに於いて、

前記凹凸の間隙が軸心より測った角度が $1/100^\circ$ より小さく、かつ、前記凹凸の凹面と凸面が、異なる性状であることを特徴とする振り振動測定方法。

## 2. 特許請求の範囲第1項に於いて、

前記凹凸などは軸表面に軸方向に平行、かつ、円周に微細な縞模様を呈するが、前記縞模様は一つおきに放射性同位元素、あるいは、レーザないし電子線により励起され易い物質、あるいは、これらの化合物を埋設あるいは接着したこ

3. 特許請求の範囲第1項において、前記回転軸の振り振動測定用被検出媒体は、前記被検出媒体の表面を清浄に保ち、前記被検出媒体に光、レーザあるいは電子線などを照射し、前記被検出媒体より反射光、励起電子線などをとらえる組み合せからなることを特徴とする振り振動測定方法。

## 3. 発明の詳細な説明

## 【産業上の利用分野】

蒸気タービンの低圧ロータの長翼が、送電系統の不平衡により逆相電流が流れ、発電機に回転数の二倍（四極機の場合は、四倍）のトルクに共振すると翼が損傷を蒙る。このため、タービン・発電機軸系の翼の速成り振り振動数の高精度測定が必要である。

## 【従来の技術】

蒸気タービン・発電機は、第3図の例に示すように、高圧タービン、低圧タービン及び発電機と複数の軸を連結したトレインを構成している。そ

のために外部よりこの軸系にトルクが作用すると、この軸系固有の振動数で振動する振り振動が誘起される。この振動は、低次の振動数のものほど誘起され易い。そのため、タービン・発電機は軸系の振り振動に対し、高速再閉路など時に軸系に多大なトルクが発生し軸系の疲労寿命を低下させることに対応し、軸振り振動計測モニタを設置し、寿命管理をするなどの対策を講じている。

低次の振り振動の場合には、以上の様に振り振動応答（振りの振幅、すなわち、振り角）が大きいために振り振動の測定が容易になつていて。

通常、負荷遮断、再投入などステップ状の大きなトルクが掛る場合でも、これにより誘起される低次の振れ振動は減衰が小さいため、その減衰過程で振動がとらえられるに対し、高次のものはステップ状のトルクに対しては、加振の時間が短いために、十分に振動が生長しない（振れ角が大きくならない）ばかりでなく、振動が生長しても加振が無くなると瞬時に減衰するため、高次の振り振動の検出は容易で無い。

以下と云はれている）により振れ振動が共振した場合、大きな振動応力が発生し翼の損傷に発展することになる。

この送電系統の不均衡による蒸気タービンに対する加振トルクは、軸を同相に振ることになるから、翼に対しては全翼を同時に同相に加振し、その結果、翼は接線方向（回転方向）に振られることになる。ところが翼は振れを持つ構造のため接線方向に振られると同時に軸方向にも振れることになり、翼全体は傘を開いたり閉じたりする様な振動を行う。そのため、アンブレラモードと通称されている。

この振動モード、すなわち、翼が軸と連成し翼が大きく振れる振動モードの振動数が、送電系統の不均衡により発生する系統周波の二倍の周波数と一致すると共振状態となり、加振トルクが大きいと翼が破損に到る場合がある。

この振動の状況は、第4図に示す。図を簡便にするため軸21に植込まれた翼22は全周に一様に植込まれているものを一本で代表して示した。

ところで、この高次の振れ振動は、蒸気タービン・発電機の軸系では、蒸気タービンの低圧ロータに植込まれた長翼の振動と、軸系との連成する翼・軸連成振り振動が問題となる。

蒸気タービン・発電機は、蒸気タービンにより発電機を回転させて発電し、送電系統により需要先に送電するが、送電系統が長くなり、かつ、送電される需要家の電気、電力の使用状況により送電系統（3相）に送電の不均衡が生じる。この不均衡により発電機に逆相電流が流れ発電機回転子に通常トルクに重複し回転子の二倍（四極機は四倍）の周波数のトルクが発生する。

この周波数は、50㎐地区の送電系統では100㎐、60㎐地区では120㎐（共にオフサイクル運転をしていない場合。通常、運転周波数の許容範囲は50㎐地区：48.5～50.5㎐、60㎐地区：58.5～60.5㎐）であり、この周波数に翼・軸連成振り振動数、特に、翼の連成するモードの固有振動数が一致すると問題であり、送電系統の不均衡の割合（一般には1%程度

第5図は、第3図の軸系に対し翼・軸連成振り振動モードを計算し120㎐近傍の振り振動モードを示したものである。各モードは、そのモードでの最大の振れ角を1として規格されている。また、図中上下方向に線上に画かれているものは、低圧タービンの最終段翼（L-O）、及び、最終段前の段の翼の振動を表しており、翼に対しては、軸の回転方向、すなわち、翼が植え込まれているディスクの外周の接線方向の倒れに該当する。

本例のタービンの場合には、送電系統の周波数の許容変動範囲の58.5～60.5㎐内で、59.5㎐または60.45㎐で運転されている場合には、その二倍のモードNo.16の119㎐、あるいは、モードNo.17の120.9㎐と共振することになる。この状態で不均衡成分の割合が大きくなると、これらの翼・軸連成振りモード、本例ではL-O翼が（特に、モードNo.17の場合には）大きく振られることになり、L-O翼の損傷が懸念されることになる。

そのため、翼の根元に歪ゲージを装着し、翼の

振動及び応力を直接測定する手段により、翼・軸連成振動を把握することが最も確実である。

しかし、翼で直接測定出来ない場合、あるいは、長期間連続的に確実にモニタしたい場合には、翼・軸連成の特質を生かし、軸側で測定することになる。

この方法には、軸に歯車を取付けこの歯車の歯の動きにより測定する方法である。第6図に示す様な歯車23を、例えば、電磁式のピックアップ24で歯車の歯25を計測すると、第7図のような波形が出力される。横軸が時間で縦軸は電圧である。一山が一つの歯に相当する。振れ振動は軸全周が同時に変化するから、図の最初の一山を過ぎると次の山の時には軸の振れ角はその時間遅れ分変化する。すなわち、第7図中の・印の相互の間隔は、この歯車を取付けた軸の振れの変化に対応し、時々刻々と変化する。この変化量を連続的に測定し、変化量の周波数分析により変化のもとになる振動成分を分析する。

この方法は、歯車と電磁式ピックアップという

比較的簡便な方法で、自動車のクランクシャフトの振れ振動とか、船舶のスクリュープロペラの振り振動とかに用いられている方法があるが、これらの機器の場合、振れ角が大きく歯車のピッチ誤差などの影響は比較的受けない。

しかし、蒸気タービン発電機の場合で、前述した様に高次の振り振動の場合は、振り振動の変動角は $10^{-3}$ 度以下と小さく、歯車の歯の出来見合いでS/N比が決ってしまうが、いかに高精度に歯車を製作してもS/N比を十分上げることは非常に難しい。そのため、高次の振り振動の測定にも限界がでてくる。

また、軸に歪ゲージを接着し測定する方法があるが、対象となる機械の軸の剛性が大きいために軸振りによる歪が極めて小さく、この場合もS/Nを十分上げることは困難である。

但し、加振力を特別に大きくし上記の測定を実施する場合は、S/Nを高めることができるため測定し易くなるが、主機の二次的な予想外のトラブルの発生などの懸念がある。

#### 【発明が解決しようとする問題点】

以上の振り振動を測定する従来技術では、振れ角の変化が小さい場合の測定は、S/N比が小さいために困難である。

そこで、S/N比を上げる手段として、信号検出時よりデジタル処理することにより、前述の歯車のピッチ誤差などのノイズが介入し、難くする方法が考えられる。

精密に回転体の回転を制御するためのロータリエンコーダは多数の格子（前述の歯車の歯に相当する）を加工、あるいは、刻印などし、この格子数をカウントすることにより回転の変動を測定し回転を制御する機能を持たせる。この格子数は、高分解能として知られるものでは、36,000本ある。

本発明はこの格子の考え方を回転体の振り振動の高次モードの測定に適用し、蒸気タービン発電機ロータ系の翼・軸連成振動の高次モード、特に、翼・軸が連成し翼が主体に振れる振動モードを軸で確実に、かつ、精度良く測定可能にすることを目的としている。

#### 【問題点を解決するための手段】

蒸気タービン発電機の高次モードの振り振動の大きさの概略を推算すると、振れ角にして大きくて $10^{-3}$ 度（通常運転での共振状態で）程度であり、これを当該タービンの軸の周上長さにすると大きくしても $5\mu$ 程度であり、振り振動をより確実に測定可能にするには $1\mu$ 、ないし、サブミクロンの周上長さを識別する能力が必要となる。

この量を、生成したロータリエンコーダの格子として、タービン軸の周上等間隔に配分すると約 $2 \times 10^8 \sim 5 \times 10^8$ 個に分割されることになる。この間隔を一個一個数えるためには、一個毎の仕切りが必要であるから、例えば、白と黒とで一個毎を仕切れば、この白黒で出来る範囲をそれぞれを合せた数は $10^7$ 個ほどの多数になる。

ところで、当該タービン発電機は $1500\text{ rpm}$ で回転し高次の振り振動で $100\text{ Hz}$ を考え、その振れ片振幅を $10^{-4}$ 度とすると、回転数の変動 $\Delta N$ は、軸の直徑をDとすれば

$$\Delta N = \frac{2\pi \times 100 \times D \times 10^{-4}}{\pi \frac{1500}{60} D} / 360$$

$$= 2.2 \times 10^{-8}$$

1500 rpm は 25 Hz であるから、100 Hz の振り振動は一回転に四回振動することになる。この振動を測定するには少なくとも 1/4 回転する間に 100 Hz の振り振動を測定しなければならない。この間に  $10^7$  個の縞模様の白黒のいずれか一方の数の変動分は、先に計算した  $\Delta N$  より

$$\frac{1}{4} \times 5 \times 10^7 \times 2.2 \times 10^{-8} = 27.5 \text{ 個}$$

また、この縞々を数える数の変動を周波数分析器（高速フーリエ変換器）で固有振動数を分析するが、分析可能な状態は、変動の正負がかならず一度ある必要があるから

$$27.5 \times \frac{1}{2} = 14 \text{ 個}$$

さらに、高次の振り振動数を考慮に入れると、

(a), (b) は光の受光反射に対応し、また、磁場を計測、さらに(c) は放射能、あるいは、励起されて放出される物異周波数の光の検出である。

いずれも縞模様の変化を数することになる。

これらは、第 8 図に直線上に示したが、これらのものが直接、振り振動を測定する個所に加工できれば良いが、現実的で無い。帶状のものを対象とする軸に巻き付け接着剤で固定するか、強固な透明、あるいは、非磁性の帶状のもので表面より固定するなどの方法をとることになる。

また、以上の縞模様は前述の様に極めて微少なものため、この縞模様表面（被検出部）の清浄具合が重要であり、検出の方法にもよるが表面を清浄にするために空気噴霧などで常に表面を周囲の塵埃、油煙などよりマスキングするなどの手段が必要となる。透明な滑らかな物質を表面にコートイングするのも効果的である。

以上の被検出部の状態が整えば、検出方法の選定になるが、磁場を応用する場合、放射性同位元素の場合を除けば、基本的には光の入射と受光と

縞の数のカウント変化は 5 ~ 10 個程度となる。

従つて、タービン発電機の振り振動、特に高次になる翼と軸が連成する振り振動の測定には、軸周上に  $0.5 \sim 1 \mu$  間隔での縞模様を構成し、その縞数の一定時間内のカウント数の変化を測定すれば良いことが分る。

先に述べた、高分解能のロータリエンコーダの格子数を比べると 1 百倍以上の数になつてゐる。

このように、軸上に周方向に構成した数多くの縞模様の数のカウントにより高次モードの軸振り振動の測定が可能であることが分つたが、この縞模様を的確に数える手段が必要である。

まず、この縞模様について述べる。

第 8 図のいくつかの例を示した。

(a) は、歯車の歯の様に凹凸状の構造である。(b) は白黒の縞模様であり白黒が光の反射の有無に対応する。また、磁性の有無を示す。(c) は凹凸の凹の部分に放射性同位元素、あるいは、レーザ、単色光などで励起される物質（例えば Na など）を固着させたものである。

いうことになる。

以上の様に、 $10^8$  個程度以上の縞模様（等間隔、厳密に等間隔で無くとも良い）とその縞模様を清浄にする手段と、その縞模様を数える検出器で、蒸気タービン発電機などの高次の振り振動の検出が可能であるが、振り振動による縞模様のカウントの数の変化量は、先に述べた様に多くの数で無い当然、通常の軸振動（軸に直角方向の振動）の影響が入ることになる。

$50 \mu$  程度の振動があるとすると、この振動は回転数と同サイクルの振動と考えて良いから、これによる軸表面の回転数変動  $\Delta N'$  は、  $D = 800$   $\phi$  とすると

$$\Delta N' = \frac{\frac{1500}{60} \cdot 50 \times 10^{-8}}{\frac{1500}{60} \cdot 800} \approx 6 \times 10^5$$

先に示した  $\Delta N$  よりはるかに大きくなる。

従つて、この量を除去する必要があるが、軸の軸と直角方向の運動に追従させる機構（例えば光

ディスクのヘッドの追従機構)では、検出器が複雑かつ使い勝手が難しい。

しかし、これは測定対象となる軸の180°逆位置に同じ検出器を置き、双方の結果を加算すればこの問題は無くなる。180°逆位置の検出器では先の $\Delta N'$ は $-\Delta N'$ となるからである。

測定上の注意で以下の問題の解決も必要となる。即ち、大型回転体、特に、高温媒体を使用するもの、特に、蒸気タービンのような大型回転体の場合には軸の伸び差を考える必要がある。あらかじめ伸び差を考え検出器の軸長手方向位置を設定すれば良いが、対象となる高転体が運転状態で伸び差が変化する場合は、検出器の位置、あるいは、軸に取り付けた模様の変更が必要となる。しかし、これでは実用的で無く、模様の軸方向長さをある程度確保しておく必要がある。

#### 〔実施例〕

本発明の実施例を第1図に示す。

軸26に堅固に固着した明暗模様の幅広帯27に対し検出器29のレーザ発振器30より光をブ

信器により設定される。

この様にして測定された出力の例を第9図に示した。やはり図示していないが、明模様の数をカウントし定常回転数(中心回転数といえる。回転数が変化している場合は、回転数変動毎に中心回転数を演算、連続的に変化する場合には回転数の変化率を求め連続的に中心回転数を演算する)との差として図示してある。図中の $\Delta t$ はインタバールでインバル毎に軸表面速度の変化、すなわち、振れ振動に基づく変化を表わしている。

この図の結果を高速フーリエ変換器により周波数分析することにより軸振れ振動の周波数成分を求めることが出来る。

また、測定に際し軸振動の影響は二ヶの同じ検出器とそれらの信号を加算することにより、除去され、さらに塵埃、油煙など環境による測定の妨害に対しても空気噴霧器により検出器周囲ならびに軸に固着した幅広帯の表面を清浄に保つ機能により、高精度の振り振動が測定可能となり、連続的に長時間、かつ、回転体の種々の運転モード、

リズム31(アイソレータ兼用)に入射し、絞りレンズ32により1μ程度のスポット状光とし幅広帯27の明模様28よりの反射光をプリズム31で偏光し受光器33で電気信号に変換し、この明模様28の一定時間間隔の数を連続的に数える。検出器29は、軸26の180°反射側にも設置され、この検出器29よりの信号を加算器30で加算し、軸26の軸振動の影響を除去している。

空気噴霧器35は、軸26の矢印の示す回転方向の検出器26の上流側に接近して配置し、検出器29よりのレーザ光の入射、受光に対しこれらの効率を良くするために、幅広帯27の表面及び検出器と幅広帯27の空間を清浄にする働きと為す。また、空気噴霧器35'は、軸26の検出器29の反対側の検出器29'の軸26の回転方向上流側にも配置されている。この状況を第2図に示す。

図示していないが、明模様の数をカウントするインターバルは、時間を正確に図れるように水晶発

たとえば、蒸気タービンの負荷変化などにも十分対応出来る。

本発明の、振り振動測定技術により回転体の振り振動のモニタないし診断が可能になり共振による回転体の損傷、特に、蒸気タービン発電機の翼軸連成機振動による翼の損傷を防止することが可能となる。

#### 〔発明の効果〕

本発明によれば、従来的確な測定が困難であつた軸振れ振動、特に蒸気タービン発電機の高次振れ振動モードである翼と軸が連成する翼・軸連成振り振動数の測定が可能となる。

#### 4. 図面の簡単な説明

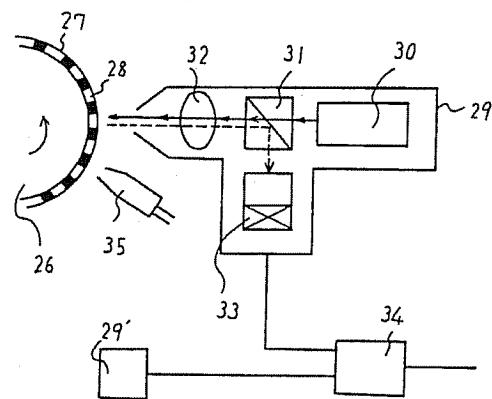
第1図は本発明の一実施例の系統図、第2図は第1図の補正図、第3図は蒸気タービン発電機の構造模式図、第4図は翼軸連成振り振動の説明図、第5図は第3図の蒸気タービン発電機の翼軸連成振り振動数の計算例図、第6図は歯車による振り振動測定例図、第7図は第6図の測定による出力波形例図、第8図は振り振動の被測定対象の模様

様例図、第9図は第1図の本発明になる測定での  
出力波形例図である。

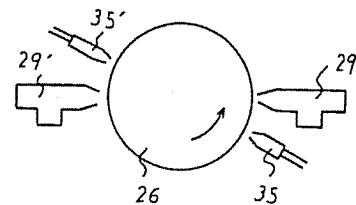
26…軸、27…幅広帯、28…幅広帯の明模様。

代理人 弁理士 小川勝男

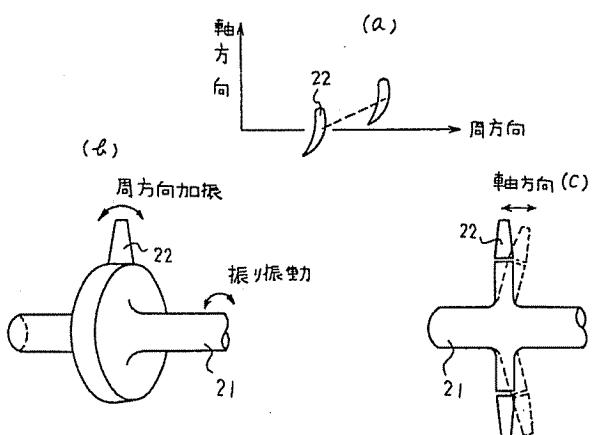
第 1 図



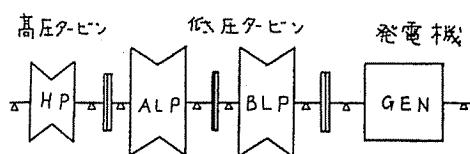
第 2 図



第 4 図

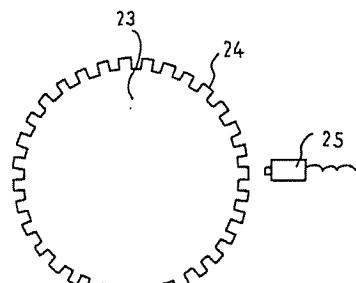
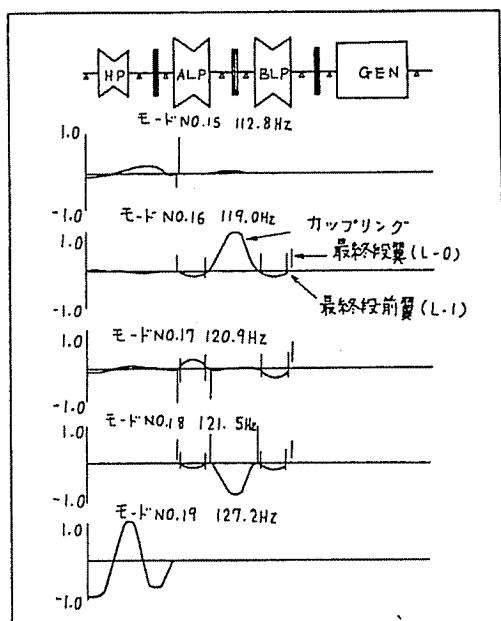


第 3 図

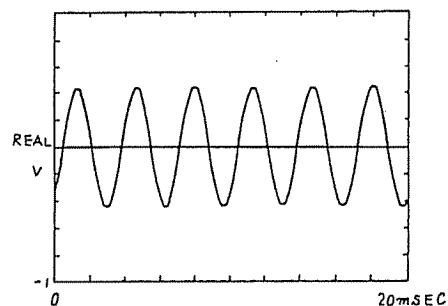


第6図

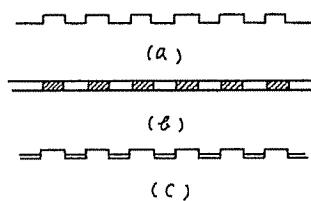
第5図



第7図



第8図



第9図

